

T/SSSC

中国土壤学会团体标准

T/SSSC 0 —2026

化工场地复合污染绿色修复管控技术规
程 水力循环强化生化修复

Technical Code of Practice for Green Remediation and Management of
Combined Contamination at Chemical Sites—Hydraulic Recirculation-
Enhanced Biochemical Remediation

（征求意见稿）

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

中国土壤学会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 总体原则	3
5 工作程序	4
6 技术适用性分析	6
7 工艺设计	8
8 工程施工	19
9 工程运行及监测	22
10 工程关闭	24
附录 A （资料性） 水力循环强化生化修复技术所需水文地质参数	25
附录 B （资料性） 常用生物及化学修复措施筛选表	26
附录 C （资料性） 常用修复材料	27
附录 D （资料性） 工程运行日常记录表	30
附录 E （资料性） 工程运行监测参数及预期结果	35

叻 詢

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国土壤学会提出并归口。

本文件起草单位：江苏省生态环境技术研究院有限公司、上海大学、中国科学技术大学。

本文件主要起草人：曲常胜、丁亮、周俊、王栋、徐鹏程、王超、李辉、相明辉、穆杨、黄大弘、夏威夷、马迅、孙玉超、王贺、刘海、刁文钦、王雯冉。

化工场地复合污染绿色修复管控技术规程

水力循环强化生化修复

1 范围

本文件确立了化工场地复合污染水力循环强化生化修复技术的工作程序，以及水力循环强化生化修复的术语和定义、总体原则、技术适用性分析、工艺设计、工程施工、运行及监测等技术要求。

本文件适用于化工场地采用水力循环强化生化修复技术开展地下水污染风险管控或修复的工程的技术遴选、方案编制、施工建设及运行管理。

本文件不适用于放射性污染、致病性生物污染或农田污染场地。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 50027 供水水文地质勘察规范

DZ/T 0148 水文水井地质钻探规程

DZ/T 0280 地下水污染地质调查评价规范

HG/T 20717 污染场地岩土工程勘察标准

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 164 地下水环境监测技术规范

HJ 2015 水污染治理工程技术导则

HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境

YS 5215 抽水试验规程

T/SSSC 0 化工场地复合污染绿色修复管控技术规程 立体阻隔

T/SSSC 0 化工场地复合污染绿色管控修复技术规程 增溶/曝气强化多相抽提

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

化工场地 chemical plant site

从事农药、染料、医药中间体等化学品生产、贮存、利用、处置活动的用地。

3.2

复合污染 co-contamination

场地中同时存在多种污染物（如有机物、重金属）的污染状态。

3.3

绿色修复管控 green remediation and control

在保障污染治理效果的前提下，以低碳、低耗、低扰动、低二次污染为核心，通过全流程优化管控措施，最小化修复工程自身的环境与资源代价，实现安全治理与生态友好协同的场地修复管控模式。

3.4

水力循环强化生化修复 Enhanced Biological and Chemical Remediation by Hydraulic

Recirculation

是指通过精确调控地下水流场，构建多尺度水力循环单元，在循环路径上耦合微生物降解、化学氧化或化学还原等生物、化学修复过程，实现地下水中目标污染物高效去除的协同修复技术。

4 惺侵吁崩

4.1 技术联合兼容原则

化工场地复合污染修复管控过程中，应坚持各类修复与管控技术协同适配、兼容联用，根据化工场地多组分、多层级污染特征，合理组合物化修复、生物修复、风险管控等技术，避免工艺冲突与功能重叠，在保证修复管控安全与效果的前提下，提升治理效率、降低工程能耗与二次环境影响，实现多技术耦合的绿色协同修复与管控。

4.2 全生命周期原则

化工场地复合污染修复管控工程应覆盖场地调查、方案设计、施工实施、运维管控、验收及后期监测全生命周期，开展连续数据监测、动态研判与综合效果评估，统筹治理成效、资源消耗、碳排放、生态影响及长期稳定性，实现效果可控、绿色效益最大化。

4.3 场地适配原则

充分考虑污染地块的水文地质条件、污染物赋存特征与空间分布规律、场地利用现状及施工可及性等因素，结合风险管控或修复目标，合理选择水力循环策略与生物、化学修复措施，确保技术方案的针对性和可实施性。

4.4 动态调整原则

鉴于水文地质条件与污染物分布刻画的不确定性，方案设计初期宜采取保守策略，预留调整空间。工程实施过程中，应依托运行监测数据与更新后的概念模型，对循环参数、井网布局及生化修复措施进行迭代优化，实现修复效果与成本投入的动态平衡。

5 帮俸穆

水力循环强化生化修复技术的工作流程涵盖技术适用性分析、工艺设计、工程施工、工程运行与监测、工程运行状况分析及工程关闭等环节，具体工作流程如下：

a) 技术适用性分析：根据地块前期调查、风险评估和运移模拟成果，结合水文地质条件和污染物特征，分析水力循环强化生化修复技术的适用性，明确修复策略与技术路线。

b) 工艺设计：包括场地条件精细刻画、生化修复措施选择、数值模拟、小试/中试、水力循环系统设计、生化注入系统设计及地上处理系统设计等内容。

c) 工程施工：包括专项施工方案编制、井的钻探与成井、辅助设施安装、水力测试与流场验证、注入系统调试及系统整体联调等。

d) 工程运行与监测：包括运行计划制定、设备维护管理、运行效果监测、监测方案优化及工程运行状况分析等。

e) 工程运行状况分析：根据风险管控或修复目标，开展工程运行状况分析，判断工程目标可达性。

f) 工程关闭：当达到修复目标或无需继续实施时，进行工程关闭与场地恢复。

水力循环强化生化修复技术工作流程如图1所示。

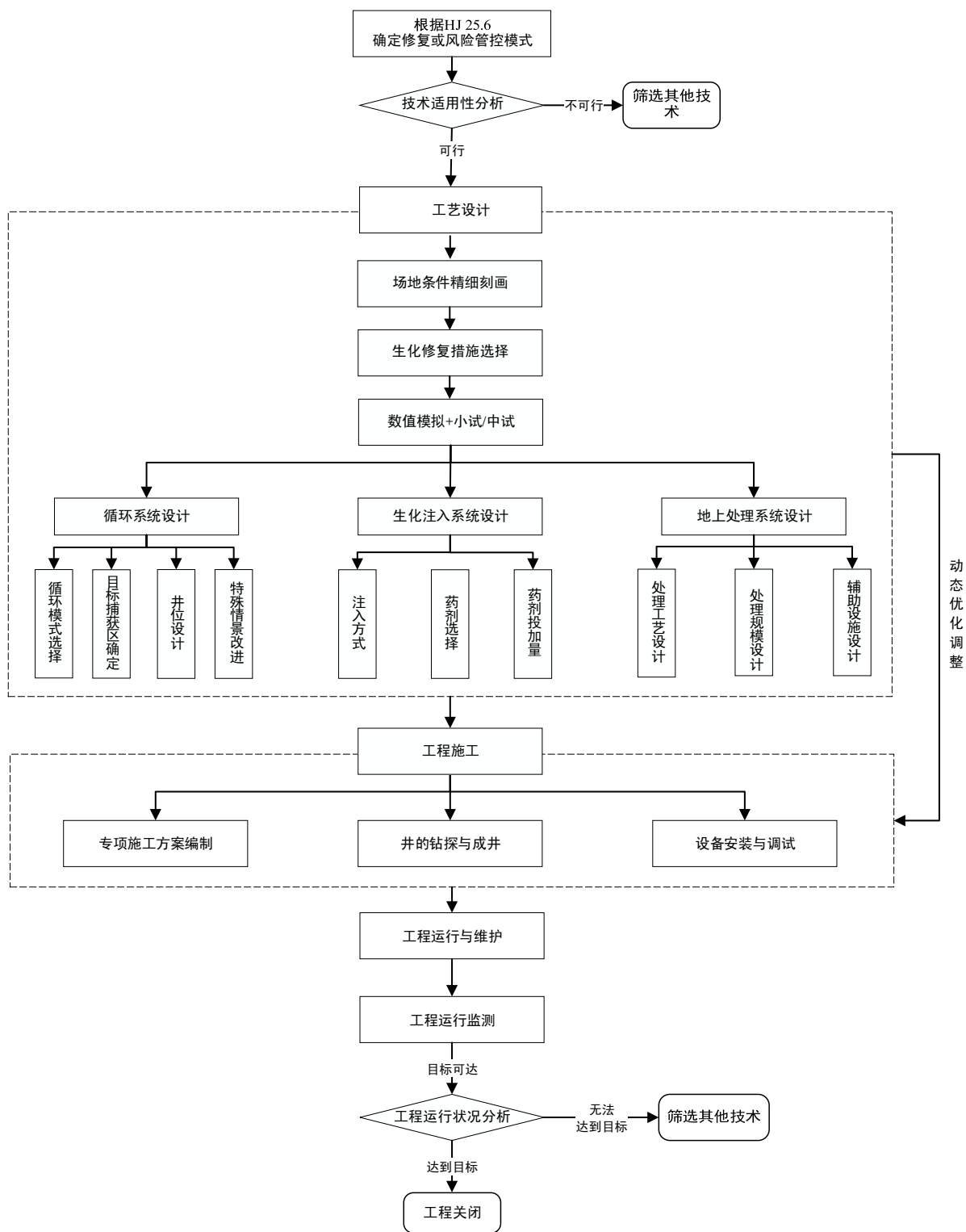


图1 工作程序

6 撬板遇叠悉割秘

6.1 适用性分析

6.1.1 污染物特征要求

本技术适用于以下类型污染物的地下水修复：

- a) 可溶性或半可溶性有机污染物，如石油烃、苯系物、氯代烃、多环芳烃及农药类等；
- b) 无机污染物，如硝酸盐、高氯酸盐及在特定氧化还原条件下可被沉淀或固定化的重金属离子等；
- c) 对微生物降解或化学氧化/还原具有响应性的污染物尤为适宜。

6.1.2 水文地质条件要求

本技术对场地水文地质条件的要求如下：

- a) 含水层渗透性：中等至良好渗透性含水层（等效渗透系数 K 在 10^{-5} ~ 10^{-3} m/s范围）最为适宜。渗透性过低（如黏土）会限制水流循环效率；渗透性过高（如巨砾石）可能导致流线过短或控制困难。
- b) 含水层非均质性：本技术可适应一定程度的非均质性。当存在薄层透镜体或高导水通道等强烈非均质条件时，需加密场地刻画精度并优化井网布设方案。水平渗透性显著大于垂向渗透性的各向异性条件有利于水平向循环流场的形成。
- c) 含水层厚度：适宜中厚层含水层（厚度一般大于3m），过薄含水层将限制井结构设计和循环效果。
- d) 地下水背景流速：在低至中等流速（小于1m/d）条件下，水力循环控制效果最优。高流速条件下维持有效循环单元需显著增大抽注流量。

6.1.3 污染特征要求

本技术对场地污染特征的要求如下：

a) 污染羽规模：适用于中小型至中等规模（数十至数千平方米）的污染羽。超大规模污染羽宜分区实施。

b) 污染深度：主要适用于浅层至中深层地下水污染（通常小于50m），深度过大将显著增加工程成本和技术复杂度。

c) 污染分布形态：适用于相对集中的污染源区或污染羽。对于大面积、低浓度污染晕，经济性可能下降。

d) NAPL存在情况：对溶解相污染修复效果最佳。当存在显著残留相非水相液体（NAPL）时，本技术可作为溶解相迁移控制与强化溶解/降解手段，但宜与源区处理技术（如气相抽提、多相抽提等）协同使用。

6.1.4 场地条件要求

本技术对场地条件的要求如下：

a) 具备充足空间布设循环井群（含抽水井、注水井或循环井）及地面处理/加药设施；

b) 具备可靠的电力供应条件；

c) 无严重地下障碍物（如密集基桩、大型地下管线等）妨碍井网安装。

6.2 不适用或需谨慎评估的情况

以下情形，本技术不适用或需谨慎评估：

a) 渗透性极低（ $K < 10^{-6} \text{cm/s}$ ）的黏土或致密基岩含水层。

b) 存在大量难处理残留相NAPL且未进行源区控制。

c) 场地空间极其受限，无法布置有效井网。

d) 地下水背景流速极高（>几米/天），难以建立稳定的水力循环控制。

e) 目标污染物对现有生物/化学强化手段无有效响应。

7 帮苜说调

7.1 场地条件精细刻画

7.1.1 水文地质特征刻画

水力循环强化生化修复工程设计须建立在水文地质条件系统分析的基础上。需查明含水岩组的类型、结构特征及空间展布形态，明确地下水的补给、径流与排泄条件。

7.1.2 污染源特征刻画

应查明污染源的类别、来源及历史变迁，识别地面与地下装置或设施的渗漏点位及渗漏特征，判定特征污染物是否以非水溶相形态赋存，评估污染源持续释放的可能性及通量大小。

7.1.3 污染分布特征刻画

污染物的空间分布与时间演变特征应通过多源数据融合进行动态刻画，数据来源包括前期场地调查资料、运行期监测数据及数值模拟结果。刻画内容包括：

- a) 污染物的类型、理化性质、毒理学参数及污染程度与范围；
- b) 污染物浓度在平面和剖面上的分布格局及其随时间的变化规律；
- c) 污染物在固相与液相间的分配特征及迁移转化趋势。

7.1.4 敏感受体识别

应结合资料收集、现场调查及健康风险评估成果，对污染源周边可能受影响的水源地、地表水体、居民区及其他敏感目标进行识别与确认。识别内容包括：

- a) 敏感受体的空间分布与保护要求；
- b) 地下水与地表水体之间的水力联系；
- c) 人群健康风险水平。

水力循环井群的布设应确保所形成的捕获区范围能够有效阻隔污染物向下游敏感受体迁移。

工程实施期间，应对敏感受体进行周期性采样评估。

7.2 生化修复措施选择

在选择地下水污染微生物修复与化学氧化/还原修复技术时，应遵循以下基本原则：

a) 基于污染物特性与降解机理选择

技术选型应首先依据目标污染物的化学性质、赋存形态及可处理性。微生物修复技术适用于可生物降解的污染物，其应用前提是确认场地微生物群落具备相应代谢功能，并能通过工程手段营造适宜代谢环境。化学氧化技术适用于可与强氧化剂发生快速反应的有机污染物；化学还原技术适用于可通过电子转移被还原至低毒或惰性形态的污染物（如高卤代有机物及部分重金属离子）。对于难生物降解的持久性有机污染物或需快速应急控制的场景，宜优先选用化学修复技术。

b) 契合修复目标与时效要求

技术选择需与明确的修复目标及工程时限相匹配。化学修复技术具有反应速率快、周期短的特征，适用于污染源区快速削减与高风险污染羽的应急控制。微生物修复技术适用于中长期的污染管控与生态恢复目标，其最终修复程度可能更高，且在全生命周期内常更具经济性。

c) 评估场地水文地质与地球化学条件的适宜性

技术可行性须建立在详尽的场地勘察基础上。含水层渗透性、异质性、地下水流场及本底地球化学条件（如pH、氧化还原电位、天然有机质及竞争性离子浓度等）均为关键制约因素。上述条件直接影响修复药剂的传输、留存、反应活性及微生物的生长与分布，应在技术应用前通过可行性试验予以评估。

d) 论证技术可行性与控制潜在风险

在技术比选过程中，应系统评估技术的实施难度、稳定性及潜在二次影响。化学修复需关注药剂的运输储存安全、反应放热风险及对地下水化学环境的改变；微生物修复需防范生物堵塞、代谢中间产物积累及菌种逃逸的生态风险。最终技术方案应基于综合风险评估确定。

e) 技术协同与序列化应用

为提升整体修复效率与成本效益，宜根据污染场地的阶段性特征，采用化学修复与微生物修复相结合的协同或序列化工艺方案。

7.3 数值模拟

为优化地下水水力循环强化生化修复技术的应用，提升污染物去除效率，应根据需要开展系统的地下水数值模拟工作。

7.3.1 数值模拟目的

地下水数值模拟旨在通过计算机数值方法，刻画水力循环驱动下的地下水流场、污染物迁移及生化降解过程，从而优化井群结构参数、水动力调控参数及生化修复条件。具体目标包括：

- a) 预测修复期内水力循环的影响范围及污染物浓度变化趋势；
- b) 评估不同运行方案下的修复效果，如污染物去除率、生物降解速率等；
- c) 识别关键敏感参数，为现场调试提供理论依据。

7.3.2 数值模拟内容

数值模拟应涵盖地下水流模型、粒子追踪模型、污染物迁移模型和生物降解模型。

- a) 地下水流模型：用于模拟循环井驱动下的三维非稳定流场，分析水头分布及流速变化，为粒子追踪和污染物迁移提供基础。
- b) 粒子追踪模型：通过计算粒子运动轨迹，表征水力循环带的范围与效率，关键指标包括影响半径、粒子回收率等。

c) 污染物迁移模型：模拟污染物在对流-弥散作用下的迁移过程，并考虑生物降解反应，以预测浓度时空变化。污染物去除率、迁移半径等作为效果表征参数。

d) 生物降解模型：模拟地下水环境中微生物对污染物的降解转化过程，耦合水流运移与生化反应作用，考虑环境因子对降解效率的影响。以污染物降解速率、生物降解贡献率作为核心表征指标。

7.3.3 数值模拟方法

模拟工作应遵循以下步骤：

a) 资料收集：收集场地地质、水文地质、污染状况及生物降解特性等资料，确保数据完整准确。

b) 概念模型建立：确定模拟范围、边界条件、含水层结构、水力特征及源汇项，概化初始流场和浓度场。

c) 数学模型构建：基于达西定律和质量守恒原理，建立地下水流偏微分方程及定解条件；污染物迁移模型则耦合对流-弥散方程与生物降解动力学方程。

d) 模拟程序选择：选用成熟数值模拟软件（如MODFLOW、MT3DMS、FEFLOW等），进行空间与时间离散，确保计算精度。

e) 模型校正与验证：利用现场观测数据（如水位、浓度）对模型参数进行识别和验证，确保模型可靠性。

f) 预测与敏感性分析：设计不同修复场景，预测长期修复效果，并分析关键参数（如循环流量、生物降解速率）的敏感性，优化运行方案。

g) 结果后处理：提取粒子回收率、污染物去除率等指标，评估修复效果，指导参数优化。

7.4 小试/中试

小试是在实验室内开展的受控模拟试验，旨在验证技术原理可行性，筛选核心修复药剂或微生物菌剂，并初步确定关键工艺参数。小试实施内容应涵盖以下方面：

- a) 对代表性场地介质进行理化性质与污染特征表征；
- b) 评估不同技术路径对目标污染物的去除效率及反应动力学；
- c) 探究修复药剂的最佳投加量与反应周期，以及水力循环速率对传质效果的影响；
- d) 初步识别修复过程中可能产生的次生环境影响。

中试是在实际污染场地进行的现场试验，核心目标是验证小试参数在真实复杂地质条件下的适用性，确定技术的作用范围，并为工程化设计提供直接依据。中试实施内容应涵盖以下方面：

- a) 通过示踪试验测定场地的实际水力特性与循环系统有效影响半径；
- b) 验证并优化小试推荐的药剂投加方案与水力循环模式；
- c) 通过密集监测网络，系统评估污染物的空间去除效果及修复边界；
- d) 综合评估修复过程对场地水质、地层及周边环境的长期影响，并进行初步的经济性分析。

7.5 水力循环系统设计

7.5.1 循环策略选择

在确定的修复或风险管控模式下，应综合考量污染物削减、污染羽阻控或修复达标等目标，合理选择循环策略并布置抽出井、注入井或循环井。

根据污染范围、场地条件与概念模型，可将修复区域划分为一个或多个水力循环单元。循环单元的构建方式包括：

- a) 抽-注井对/井群：抽水井与注水井分离布置，通过抽注联动形成定向水流；
- b) 单井循环系统：在单一井管内不同深度实现抽水与注水，节省占地空间，尤其适用于垂向污染分布或空间受限场地。

基于不同循环单元的特征，可组合采用以下循环策略：

a) 总量削减策略

快速、大规模移除含水层中可迁移污染物（溶解相和轻质非水相液体），显著降低污染负荷总量，控制污染核心区域。该策略在大流量运行时可能产生拖尾和反弹效应，对低渗透区效果较差。捕获区范围、污染物抽出速率及削减率是评估该策略的关键指标。布设时主要约束条件为：抽水流量相同时抽出速率最大化；抽出速率相当时抽水流量最小化。

循环系统布设要求包括：

- 1) 抽水井应重点布设于高浓度区域，通过改变局部水力梯度形成向高浓度区汇聚的捕获流场，削减向下游迁移的污染物通量；
- 2) 抽水井群沿污染羽均匀布设，最大限度覆盖污染范围；
- 3) 在处理能力允许范围内，优化抽水井数量、间距、流量及开筛位置，实现抽出速率最大化。

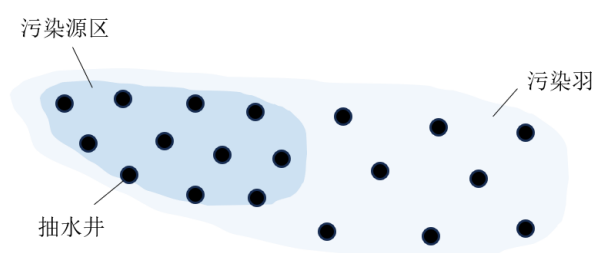


图 2 总量削减策略示意图

b) 污染羽汇集策略

在污染羽得到初步控制后，主动引导地下水流向，遏制污染羽进一步扩散（尤其是向下游迁移），并促进污染物向处理区运移，实现水力控制下的原位循环处理。该策略可有效约束污染羽

范围，促进低浓度区域修复。捕获区范围与流场控制状况是评估该策略的关键指标。布设时主要约束条件为：抽水降深足以形成有效水力阻隔；抽水流量最小化。

循环系统布设要求包括：

1) “下游注上游抽”：在污染羽下游注入清洁水或处理后的水（可含修复药剂），在上游抽提污染地下水，形成定向水流牵引污染物向抽提井运移；

2) “中心抽四周注”：在污染羽核心区抽提，外围（上游及侧翼）注入，形成向中心汇聚的汇流场，将外围污染物牵引至中心处理区，同时构建水力控制屏障阻止污染物向外扩散；

3) 井群数量、间距及排列方式应最大限度阻隔和截获污染羽，在有效阻止污染物向下游迁移的前提下，设计最小抽水量。

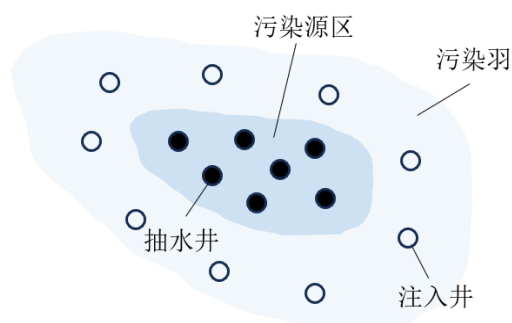


图 3 “污染羽中心抽四周注”示意图

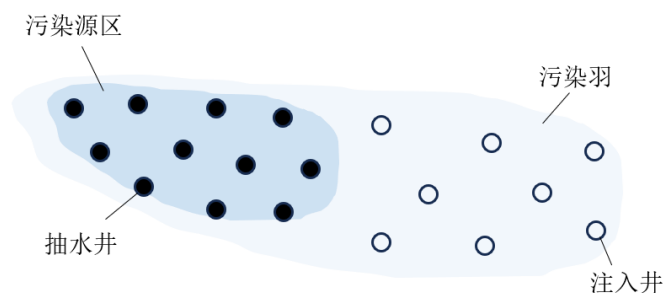


图 4 “下游注上游抽”示意图

c) 循环井策略

针对局部残留的高浓度污染点位或难以有效处理的区域，进行高强度的原位循环处理。在单井或多井内部形成垂向或小范围循环，实施深度“冲洗”。该策略对局部顽固污染源处理效率较高，可灵活应用于不同深度的污染带。

循环系统布设要求包括：

- 1) “上注下抽”：在同一井（或相邻井）的上部注入处理液（水/药剂），下部抽提，形成井内垂向循环流场，处理井周附近污染；
- 2) “下注上抽”：原理同上，方向相反，适用于不同污染分布情况。

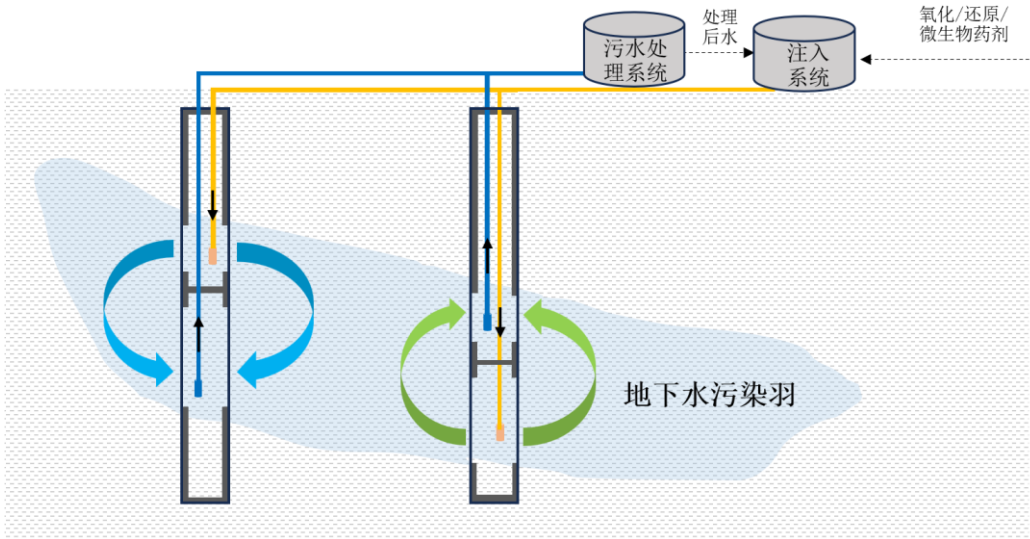


图 5 井内上注下抽或下注上抽

d) 局部强化策略

基于工程实施过程中的详细监测数据（污染物浓度分布、水文地质参数变化、修复效果等），识别修复效果不达标、残留浓度偏高或迁移风险较大的“薄弱区”，实施精准强化的补充修复措施（如缓释药剂投加、生物刺激/强化等）。该策略资源投入更精准，可有效解决“拖尾”和“反弹”问题。

循环系统布设要求包括：

- 1) 在薄弱区增建抽提井或注入井，调整已有井运行参数（流量、注/抽切换模式）；
- 2) 在薄弱区注入更高效或更具针对性的修复药剂；
- 3) 依赖高质量、高密度的监测数据，具备灵活调整方案的能力。

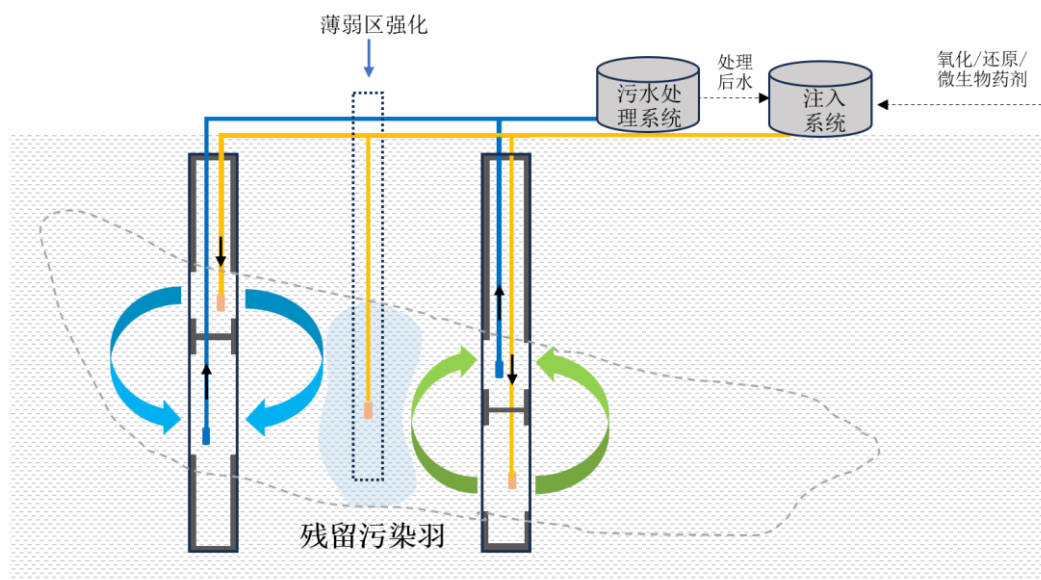


图 6 局部强化策略示意

7.5.2 目标捕获区确定

依据地下水污染特征分布，基于确定的风险管控或修复模式，明确各循环策略下的目标捕获区。

目标捕获区应根据污染羽范围的变化进行动态调整。当存在多种目标污染物时，目标捕获区应能覆盖每种目标污染物的迁移范围。目标捕获区应在修复方案和监测计划中予以明确，并在相关平面图和剖面图上标注。

7.5.3 主要井设计

a) 常规抽出和注入井设计

抽出井、注入井和监测井应根据已有资料和现场条件进行科学设计。各类井宜统筹规划、同步设计，在满足各自功能要求的前提下实现一井多用。当垂向上存在多个受污染含水层时，应分层设计独立抽水井并做好分层止水，防止串层污染。

1) 筛管设计要求

抽水井筛管顶端应高于污染羽上界，底端应延伸至污染羽下界，确保垂向上污染羽的完整捕获。筛管的具体长度和开筛位置应根据含水层结构和循环策略进行优化调整。

监测井应设置于污染羽所在的目标含水层中，满足地下水水位、水温、水质等指标的监测需求。筛管顶端应高于丰水期最高水位不少于1.0m，底端应低于枯水期最低水位不少于1.0m。当涉及重质非水相液体时，筛管应布设于目标含水层底部；当涉及轻质非水相液体时，筛管应布设于目标含水层顶部。

2) 孔径、井径设计要求

抽水井井管内径不应小于110mm，以满足预计抽水量和水泵安装要求，并可根据实际需要适当增大。终孔直径应根据井的类型、井管与筛管规格、填砾厚度等综合确定，相关标准可参照DZ/T 0148执行。监测井井管内径不应小于50mm，以满足洗井和采样要求，其他建设要求按HJ 164执行。兼具抽水和监测功能的井应同时满足DZ/T 0148和HJ 164的要求。

3) 井管材质设计要求

井管材质应根据井深、井径、材料强度、化学稳定性、地下水腐蚀性、生物作用及造价等因素综合选定。管材应坚固耐用、耐腐蚀，且不得影响地下水水质。宜选用PVC管、不锈钢管或无砂混凝土管等材料，并考虑管材与污染物的相容性。井管接口应采用螺纹连接方式，严禁使用任何粘接剂。

b) 循环井设计

循环井是一种在单一井体内设置两个及以上筛管段的特殊井型。通过上下筛管间的抽注水操作形成井内外水位差，驱动地下水在三维空间内形成循环流场，产生垂直方向的椭圆形渗流场，增强对含水层尤其是低渗透地层的垂向冲洗能力。与传统“抽出-处理”技术相比，循环井无需将地下水移出含水层，对地下水位和水量影响较小。

循环井井体由不透水阻隔器分隔为上下两部分，一套抽注水管穿过阻隔器伸入下井段。在上下筛管间形成的压力梯度驱动地下水循环流动。按井外水流方向可分为正循环模式（井外水流自上而下）和逆循环模式（井外水流自下而上）。污染地下水可抽至地表处理，亦可在井内设置生物反应器或添加药剂进行原位处理后回排含水层。

7.6 生化注入系统设计

应根据污染物特性（可降解性、可氧化/还原性等）和场地水文地质条件，选择最有效的生化强化措施（微生物强化、化学氧化/还原等）。

注入点通常利用原位注入井投加修复药剂，包括电子受体/供体（如氧气源、碳源）、营养盐、氧化剂（如过硫酸盐、高锰酸钾）、还原剂（如零价铁、多硫化钙）、表面活性剂或功能微生物菌剂等。必要时可在循环路径上增设专用注入点。

注入方式包括：连续注入、间歇脉冲注入和一次性缓释注入。应根据药剂半衰期、反应速率和修复目标合理选择。

药剂浓度与投加量应基于小试/中试数据、数值模拟计算和工程经验确定，确保有效浓度覆盖目标处理区，同时避免药剂浪费或不良副反应。

7.7 地上处理系统设计

地面处理系统设计包括处理规模、处理工艺及辅助设施等内容。设计参数应通过小试和中试获取，并根据运行监测数据进行动态优化。系统设计应在建设投资和运行费用之间取得平衡。当

污染地块周边已有可利用的处理设施时，应充分利用以节约建设成本。设计阶段应统筹考虑二次污染防治措施，包括异味控制和降噪措施，当存在挥发性有机污染物时应采取专项处置措施。

7.7.1 处理规模设计

处理系统的设计规模应满足不同循环方案下的最大日抽水量和抽气量需求，防止进水量超出设计能力导致污水未经处理直排。

7.7.2 处理工艺设计

处理工艺应根据污染物类型和处理规模确定，确保出水水质持续稳定达标。处理工艺和方法可参照HJ 2015及相关工程技术规范执行。

7.7.3 辅助设施设计

辅助设施涵盖给水排水系统、流量计量装置、水质监测设备、电气与自控系统及设备房等，应在处理系统主体基础上配套设计，为工程运行提供保障。

8 帮帮帮

8.1 专项施工方案

施工前应核实以下情况并据此编制专项施工组织方案，同时针对可能出现的风险（如药剂迁移超标、井堵塞、设备故障等）制定应急预案：

- a) 现场地形地貌、建（构）筑物、地下管道及其他设施与障碍物分布情况；
- b) 工程地质与水文地质资料；
- c) 气象与水文资料；
- d) 工程用地、交通运输及环境条件；
- e) 施工供水、排水、通信、供电等保障条件；
- f) 其他与施工相关的情况和资料。

8.2 井的钻探与成井

井的钻探与成井应严格按照设计位置和深度执行。成井工艺包括下管、填砾、止水及洗井等环节，各环节均应符合DZ/T 0148的相关要求。

钻进方法可根据地层条件选择取芯钻进、全面钻进或扩孔钻进。开孔工艺宜优先采用一径成井工艺。施工过程中应采取措施防止钻探导致串层污染及设备清洗引发的二次污染。当受地面设施限制无法实施竖井钻探时，可采用定向斜井、水平井或排水沟替代方案。

筛管类型（含缠丝筛管、条缝筛管和包网筛管等）应根据含水层类型、水质条件、孔深及建井需求确定，具体参照DZ/T 0148执行。基岩裂隙水或岩溶水含水层宜选用条缝筛管或缠丝筛管；松散岩类孔隙水中砾石、卵石介质宜选用条缝筛管或缠丝筛管，中砂至粉细砂介质宜选用配合管外填砾的包网筛管或条缝筛管。

滤料应采用经清水或蒸汽清洗、按比例筛选、化学性质稳定、成分明确且粒径均匀的球形颗粒。滤料粒径与筛缝宽度应与含水层介质粒径匹配，具体换算关系参照DZ/T 0148执行。滤料在运输、存储和使用过程中应防止与污染物接触及外部杂质混入。过滤层上下部环状间隙应采用膨润土（黏土球）进行封隔止水。

成井后应及时开展洗井作业，至水清砂净为止。洗井方法可采用气提法或抽水法，不得使用化学洗井法。洗井设备可选用活塞、空压机、离心泵或潜水泵等，设备选型应根据地下水位埋深和出水量确定。

8.3 辅助设施安装

辅助设施安装主要包括以下内容：

a) 水泵及管路系统：安装潜水泵或离心泵（需考虑耐腐蚀性和流量扬程需求），连接管道、阀门、流量计及压力表；

- b) 水处理设备：根据处理工艺要求安装相应水处理设施；
- c) 加药系统：安装药剂存储罐、配药罐、计量泵及加药管线；
- d) 监测系统：安装水位计、水质在线传感器、流量传感器及压力传感器，配套数据采集与监控系统，实现远程监控和自动控制（如根据水位/水质自动调节泵频或加药量）；
- e) 集成设施：建设设备棚或集装箱式集成撬装单元。

8.4 水力测试与流场验证

成井后应开展抽水试验，计算含水层渗透系数并评价出水量。根据含水层性质、污染物特征及浓度等参数设计合适的抽水量，并依据设计抽水量、稳定水位降深和季节性水位变化选择水泵类型、规格及放置方式。试验方法参照YS 5215执行。

根据项目需要，可酌情开展示踪剂试验（如荧光染料、盐类示踪），通过监测井取样分析，实际验证地下水流场是否达到设计预期（包括循环路径、捕获区范围及停留时间等）。

8.5 注入系统调试

注入系统调试应遵循“低浓度起步、逐步提升”的原则。初始采用低浓度药剂注入，密切监测目标区和下游水质、地球化学参数及压力变化。观察是否存在不利反应（如气体堵塞、沉淀导致渗透性下降等），据此逐步调整至设计浓度和注入方案。

8.6 系统整体联调

抽出井及注入井建设及洗井完成后，应按设计要求开展水泵、输水管道、流量计及自控设备等的安装与调试。水处理设施和构筑物施工完成后，应根据相关技术规范开展满水试验、气密性试验等检测。处理系统整体施工完成后应进行试运行，确保各单元运转正常。系统正式运行前，在进水符合设计要求的前提下，处理终端出水水质应稳定达到设计标准。

8.7 施工过程质量控制

进场设备设施、管材、管道附件及主要原材料须进行进场验收并妥善存放。施工过程应实施动态质量管理，确保质量、进度、成本和安全目标实现。各单体设施和构筑物应按施工组织方案实施，完工后进行检验；单体间的衔接应满足工艺设计要求并进行交接检验。施工过程中出现技术问题时，应根据实际情况对设计进行必要修改和调整。

9 帮穆進祢听昭漫

9.1 工程运行与维护

a) 运行计划制定

应根据工作目标，针对抽出井、注入井、循环井、水泵及水处理设施制定运行维护要求，编制设备操作规程与维护方案，建立药剂与材料管理制度，并做好运行过程记录。

b) 设备操作与维护

工程设备设施包括各类施工井及监测井、在线监测系统（水温、水位、基本理化指标等）、自动化控制设备和水处理设备，应严格按照设备操作规程运行。

各类施工井应设置井口保护装置，定期测量井口高程。出现坍塌、损坏或堵塞时应及时维修或重建；定期检查自控设备和水泵运行状况，出现水量、水压或能耗异常时应停机检修；定期检查管网，出现堵塞或泄漏时及时维修更换；定期检查水处理设备，异常时按维护手册检修；定期（如每周/每月）巡检设备运行状态、泄漏和异响情况；定期（如每月/每季）校准传感器（流量计、压力表、在线水质仪）；定期清洗管道、过滤器和加药管线，防止堵塞。

c) 运行维护过程记录

应完整、准确记录各类施工井、在线监测系统、自控设备、水泵、管网和水处理设备的运行参数及维护情况，并对采集数据进行分析，及时发现潜在问题。

9.2 工程运行监测

a) 运行效果监测

应围绕不同循环策略的风险管控或修复目标，开展工程运行效果监测。监测井应包括对照井、内部监测井和控制井，宜充分利用已有井，必要时新建。监测井布设要求和监测频次可参考 HJ 25.6。

水力参数监测：定期（如每日/每周）人工或自动记录各井水位、流量和压力，监控系统运行稳定性。

水质与地球化学监测：高频监测（运行初期可每周）：循环单元内关键监测井的目标污染物浓度、降解产物、氧化还原电位、溶解氧、pH、电导率、温度、关键离子（如氯离子、硫酸根、硝酸根、亚铁离子）、总有机碳及生物指标（如脱卤菌功能基因）等；低频监测（如每月）：边界及背景监测井的全面水质分析；实时在线监测（如配备）：提供即时反馈数据。

b) 监测方案的优化

监测方案应根据概念模型更新情况，结合数值模型计算进行优化调整。当存在非水溶性有机物、污染物迁移性较强、含水层非均质性显著或地下水补径排条件发生变化时，宜加密监测点位并提高监测频次。若污染物在含水层中存在明显垂向差异，应加强垂向水质监测。

c) 处理系统运行监测

应对水处理设备的进水和出水水质开展监测，确保处理设备进出水水质满足系统设计要求。当进水水质不符合系统要求导致出水不稳定时，应增设必要的预处理环节。

d) 监测方式选择

地下水监测以定期人工采样为主，可根据采样难度、经济条件和数据精度需求，辅以在线实时监测设备。鼓励采用在线监测技术监测地下水位。

9.3 工程运行状况分析

应根据运行监测获取的地下水流场、污染羽分布及变化、捕获区动态特征等数据，分析工程运行状况。结合数值模型计算，对污染羽阻控和污染物削减趋势进行评价，判断当前工程的有效性，分析风险管控或修复目标的可达性。必要时可对井位、数量、抽水量及注入药剂量等进行优化调整。

修复模式下，在停止抽出后应持续监测地下水中污染物浓度变化，并参照HJ 25.6采用运行阶段监测数据进行修复达标初判。若未能达到修复目标或出现浓度反弹，应及时开展原因分析，选择调整工程方案或结合其他修复技术。

10 帮帮冥陌

经风险管控和修复效果评估，当满足以下条件之一时，可关闭水力循环强化生化修复工程：

- a) 目标污染物浓度持续达到既定修复目标；
- b) 无需继续实施修复工程，且连续2年均满足风险管控目标。

工程关闭后，应对相关构筑物和处理设备设施进行拆除。废弃井应按照《废弃井封井回填技术指南（试行）》进行回填处理。妥善处置固体废弃物，防止造成二次污染，逐步恢复场地条件。开展后期环境监管的地块，应保留必要的地下水监测井，并按后期环境监管要求每年至少开展一次监测。

附录 A

(资料性)

水力循环强化生化修复技术所需水文地质参数

水力循环强化生化修复技术所需水文地质参数见表A.1。

表A.1 水力循环强化生化修复技术所需水文地质参数

水文地质参数	设计用途	获取途径
有效孔隙度	地下水流速计算与药剂传输时间预估	室内土工试验
渗透系数	井间距设计、抽注流量计算及影响半径评估	抽水试验、微水试验
给水度	潜水含水层条件下抽水量与降深关系计算	抽水试验
弹性释水系数	承压含水层条件下抽水量与降深关系计算	
水力梯度	判定地下水流向及污染物迁移方向与速率	水位统测
地下水流速	评估循环流场控制效果与停留时间	水位统测、抽水试验、流向 流速仪、示踪试验
地下水水位（丰、平、 枯期）及含水层顶底板 标高	确定筛管布设位置，判断 NAPL 迁移方向与可 能富集区	水位统测、钻探、物探
介质粒径分布	确定滤料级配及筛管缝隙尺寸	岩心采样、土工试验
含水层各向异性比	评估水平与垂向循环流场差异，指导循环模式 选择	多井抽水试验、微水试验

附录 B

(资料性)

常用生物及化学修复措施筛选表

常用生物及化学修复措施筛选表见B.1。

表B.1 常用生物及化学修复措施筛选表

序号	生化措施	介绍	目标污染物	地块适用性	技术成熟度	时间	效率	成本	环境风险	优点	缺点
1	化学氧化	通过向土壤或地下水的污染区域注入氧化剂，通过氧化作用，使地下水中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质	石油烃、酚类、甲基叔丁基醚、氯代烃、多环芳烃和农药等	适用于渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层	技术成熟，国内有较多应用	较短	高	高	高	反应速度快，修复时间短	地块水文地质条件可能会限制化学物质的传输；受腐殖酸含量、还原性金属含量、土壤渗透性、pH变化影响较大
2	化学还原	通过向土壤或地下水的污染区域注入还原剂，通过还原作用，使地下水中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质	重金属和氯代烃等	适用于渗透性较好的孔隙、裂隙和岩溶含水层	技术成熟，国内有较多应用	较短	高	高	高	反应速度快，修复时间短	水文地质条件会限制化学物质的传输；一些含氯有机污染物的降解产物有毒性；部分污染物的还原效果不稳定
3	微生物修复	通过注入微生物药剂（如土著微生物或接种微生物等）和微生物反应所需要的物质，使得污染物在微生物作用下发生加速降解	易生物降解的有机物	适用于孔隙、裂隙、岩溶含水层	技术成熟，国内已有应用	较长	中	低	中	对环境影响较小	部分地下水环境不适宜微生物生长

附录 C

(资料性)

常用修复材料

C.1 常用碳源材料

强化厌氧生物修复常用碳源材料的类型及特性见表 C.1。

表 C.1 常用碳源材料类型及特性

碳源类别	代表材料	释放与持续特征	适用情形
水溶性碳源	乳酸盐、糖蜜、乙醇、甲醇等	溶解迅速、粘度低，易于注入与地下传输，持续时间为数天至数月	需快速建立还原环境的场合，需按周期补充注入
缓释型碳源	乳化植物油、聚乳酸酯类制剂	吸附于含水层介质后缓慢释放，持续时间可达 1~2 年	中长期维持还原环境，减少注入频次
固体碳源	木屑、秸秆、棉籽壳等农林废弃物	填充体内长期释放，使用寿命可达 5 年以上	生物反应墙（反应带）填充介质

C.2 常用氧化药剂

常用氧化药剂的性质及适用性分析见表 C.2。

表 C.2 常见氧化药剂的性质

氧化剂	反应自由基	氧化电位 (Eh)	形态	药剂持续性	安全性	易氧化的污染物	适用性分析
高锰酸钾	MnO_4^-	1.7V	粉末/紫色溶液	>3 个月	较安全	四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯、苯系物、多环芳烃等	高锰酸钾价格便宜，技术成熟，但氧化能力较弱，氧化处理的污染物范围相对有限。为紫红色，使用感官效果不好。
芬顿试剂	$\text{OH}\cdot$	1.7V~2.8V	液体	几分钟至数小时	易爆炸	三氯乙烷、四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙	芬顿试剂的主要成分是双氧水，易爆炸；自身分解迅猛，产生大量热和气味，从而进一步促进有机污染物的

氧化剂	反应自由基	氧化电位 (Eh)	形态	药剂持续性	安全性	易氧化的污染物	适用性分析
						烯、苯系物、氯苯、苯酚等	挥发；由于 SOD 高，对有机质含量较高的土壤适应性较差。
臭氧	O ₃	2.1V~2.8V	气体	几分钟至数小时	呼吸毒性	四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯、苯系物、氯苯、苯酚等	臭氧具有毒性，易分解，腐蚀性强，且反应时间短，由于多相间传质阻力，不适用于饱和层修复。
过硫酸盐	SO ₄ ·	2.1V~2.6V	粉末 / 溶液	2~3 月	较安全	四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯、苯系物、氯苯、硝基苯、苯酚等	适应性强：可结合化学氧化作用来处理土壤/地下水中的污染物；该药剂的化学氧化作用持续时间长，可持续 2~3 个月；氧化性强，广谱：可处理众多难降解化合物。

C.3 常用还原材料

常见的还原剂包括连二亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、硫酸亚铁、多硫化钙、二价铁、零价铁等，各类材料的特征及使用方式如下：

a) 连二亚硫酸钠（保险粉）：水溶性强还原剂，溶解后迅速消耗地下水中溶解氧并营造强还原环境，可促进氯代污染物的还原脱卤；作用时间较短，多配制成溶液通过注入井间歇投加，投加过程中应做好防潮防火措施；

b) 亚硫酸氢钠：性质温和、水溶性好，主要用作地下水中溶解氧的清除剂，用于建立并维持厌氧还原环境，常与其他还原药剂配合使用，用量宜根据溶解氧水平经试验确定；

c) 硫酸亚铁：水溶性亚铁盐，注入后提供二价铁电子供体并可中和部分碱性，适用于营造还原氛围及配合硫化物生成硫化亚铁沉淀；溶液易氧化失效，宜现配现用并避免长时间

曝气；

d) 多硫化钙：液体还原剂，注入后缓释多硫化物与硫代硫酸盐，还原作用持久，适用于氯代烃及六价铬等污染物的还原处理；药剂呈碱性，使用时应评估并控制对地下水 pH 的影响；

e) 二价铁：以可溶性亚铁盐（氯化亚铁、醋酸亚铁等）及其胶体、络合制剂形式注入，反应速率快，可迅速消耗氧化性组分；胶体化或络合改性有助于延长药剂在含水层中的迁移距离和作用时间；

f) 零价铁：包括颗粒零价铁(反应平稳，多用于反应墙充填介质)、微米及纳米零价铁（活性高，适用于直推注入或注入井投加，纳米材料宜配合分散剂使用）以及硫化、双金属、碳基负载等改性零价铁（选择性与耐久性提升），是长效还原处理中最常用的固体还原材料。

C.4 功能微生物菌剂

针对氯代烃等污染物的生物强化，可投加含脱卤呼吸功能菌的微生物菌剂。菌剂投加前应确认菌剂活性、目标污染物的降解谱及其与场地环境条件（pH、温度、盐度等）的相容性；投加宜伴随电子供体与营养盐的同步补充，并可通过功能基因定量检测跟踪菌剂的定殖与富集状况。

附录 D

(资料性)

工程运行日常记录表

本附录给出水力循环强化生化修复工程运行期间的系列日常记录表,包括水力循环系统运行记录表(表 D.1)、药剂投加记录表(表 D.2)、地面处理系统运行记录表(表 D.3)及异常情况处理记录表(表 D.4)。运行维护单位应指定专人每日填写,经运行负责人审核签字后按月装订归档,作为工程运行状况分析、动态优化调整和修复效果评估的基础资料。

D.1 水力循环系统运行记录表

本表用于记录抽水井、注入井、循环井及配套水泵、管路的逐日运行状况,格式见表 D.1。

表 D.1 水力循环系统运行记录表

井号	运行模式	运行时段	流量 (m ³ /h)	累计 运行 时间 (h)	动水 位埋 深 (m)	注入压力 (MPa)	现场水质 (pH、水 温、电导率)	备注

D.2 药剂投加记录表

本表用于记录碳源、氧化剂、还原剂、营养盐、微生物菌剂等各类药剂的逐批投加情况，格式见表 D.2。

表 D.2 药剂投加记录表

[illegible]

D.3 地面处理系统运行记录表

本表用于记录地面处理单元（沉淀过滤、吸附、氧化处理、清水回用等）及主要机电设备的逐日运行与维护情况，格式见表 D.3。

表 D.3 地面处理系统运行记录表

[illegible]

D.4 异常情况处理记录表

本表用于记录运行期间发生的设备故障、停电、药剂泄漏、出水超标、监测数据异常波动、井堵塞及周边环境投诉等异常事件及其处置过程，格式见表 D.4。

表 D.4 异常情况处理记录表

[illegible]

D.5 填写说明

a) 各表表头的工程名称、运行单位、记录日期、天气及填表人、审核人等信息应逐日填写，审核人宜为运行负责人；

b) 每口运行井单独填写一行，运行模式注明抽水、注入或井内循环；停运井应在备注栏注明停运原因及预计恢复时间；

c) 流量、动水位及注入压力填写当日均值，宜取自动监测系统数据；数据突变时应现场复核确认后方可填入；

d) 药剂类别按碳源、氧化剂、还原剂、营养盐、微生物菌剂等填写，投加方式注明连续、间歇脉冲或缓释投加；氧化剂、还原剂等危险化学品投加应同步记录安全防护与计量器具检定情况；

e) 地面处理系统进出水水质可填写在线监测指标（pH、浊度、电导率等）及当日采样送检结果，出水应对照排放或回用标准判定达标情况；

f) 发生重大异常（如药剂大量泄漏、出水严重超标、影响周边敏感受体）时，除填写表 C.4 外，还应按规定及时上报建设单位及相关主管部门；

g) 采用电子化运行管理系统的，可按本附录表式建立电子台账；电子记录应可追溯、可导出，并定期备份。

附录 E

(资料性)

工程运行监测参数及预期结果

水力循环强化生化修复工程运行期主要监测参数的类别、监测意义及预期变化趋势见表 E.1，可用于运行状况诊断和修复效果阶段性评估。

表 E.1 水力循环强化生化修复工程运行监测参数及预期结果

监测参数	参数类别	监测意义	预期变化趋势
目标污染物浓度	污染物	直接表征修复效果	循环单元内持续下降
降解中间产物	污染物	判断反应路径是否完整，防范有害副产物积累	运行初期可能升高，后期回落
氯离子	污染物	脱氯进程的间接指示	随脱氯进行升高后趋于稳定
地下水水位与降深	水力	流场控制状况与系统运行稳定性	维持在设计区间内
抽注流量	水力	循环强度的表征	与设计流量偏差不宜大于 10%
注入压力	水力	判断井堵塞或地层裂隙化风险	保持平稳，无骤升骤降
pH	地球化学	微生物活性与化学反应适宜性	维持在工艺适宜区间（一般为 6.5~8.5）
氧化还原电位	地球化学	好氧或厌氧环境的判定	好氧工艺趋升；厌氧工艺降至强还原区间
溶解氧	地球化学	好氧降解供氧状况	好氧工艺宜保持 2mg/L 以上
电导率	地球化学	药剂扩散范围与离子强度指示	注入期升高，随扩散稀释回落
温度	地球化学	微生物活性与反应速率	变幅不大于天然波动范围
总有机碳与挥发性脂肪酸	生化	碳源释放与利用状况	维持在设计的有效区间
硫酸盐、硝酸盐	电子受体	竞争性电子受体消耗进程	厌氧工艺下持续下降
亚铁离子	地球化学	铁还原及还原材料消耗指示	厌氧、还原工艺下升高
脱卤功能基因丰度	微生物	降解菌群富集程度	上升并趋于稳定
处理系统进出水水质	工程系统	地面处理单元达标性	出水持续满足排放或回用要求